

SÄHKÖAUTOJEN YLEISTYMISEN VAIKUTUKSET PIEN- JÄNNITEVERKKOON

Sieppi Aleksi

Opinnäytetyö
Tekniikan ja liikenteen ala
Sähkötekniikka
Insinööri (AMK)

2017

Tekniikan ja liikenteen ala
Sähkövoimatekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Aleksi Sieppi	Vuosi	2017
Ohjaaja	Ins.Seppo Penttinen		
Toimeksiantaja	Rovakaira Oy, DI Marko Haaranen		
Työn nimi	Sähköautojen yleistymisen vaikutukset pienjänniteverkkoon		
Sivu- ja liitesivumäärä	41 + 0		

Sähköautojen yleistyminen Suomessa on tekniikan kehittymisen ansiosta kasvanut viimeisen vuosien aikana. Sähköautojen vähäisten kasvihuoneilmiötä aiheuttavien päästöjen johtuen, Suomen energia- ja ilmastostrategia on esittänyt suunnitelman nostaa sähköautojen määrää Suomessa 250 000:een vuoteen 2030 mennessä.

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin sähköautojen yleistymisen vaikutuksia Rovakaira Oy:n pienjänniteverkossa. Työn tarkoituksena oli selvittää tutkittujen pienjänniteverkkojen nykyistä kuormitusta ja sen kasvua, kun sähköautojen lataus suoritetaan pistorasian välityksellä. Pienjänniteverkon kestävyyttä tutkittiin porrastetusti, kun 30,50 ja 100 prosenttia kaikista käyttöpaikoista lataa sähköautoa samanaikaisesti. Tutkimus suoritettiin käyttämällä asiakkaiden todellisia etäluetavalta mittarilta saatuja tuntitehoja vuodelta 2016.

Opinnäytetyössä selvitettiin sähköautojen tekniikan eri muotoja, sähköajoneuvojen eri latausmenetelmiä sekä pienjänniteverkon rakennetta. Pienjänniteverkon suojausta tarkasteltiin sähköautojen tilapäisen latauksen kannalta, verkon nykyhetkisestä infrastruktuurista johtuen. Pienjänniteverkon suojauksessa tutkittiin muun muassa pienjännitejohdon ja jakelumuuntajan termistä kestoisuutta, lähtösulakkeiden kokoa sekä pienjännitejohdon jännitteenalenemaa. Opinnäytetyössä käytettiin internet- ja kirjallisia julkaisuja tiedonlähteenä.

Tutkimuksen tulokset antavat tulevaisuuden pienjänniteverkon suunnittelun ja uudelleen mitoituksen kannalta tärkeää pohjatietoa. Tutkimuksen perusteella voidaan arvioida pienjänniteverkon uudelleen mitoittamisen kannattavuus sähköautojen yleistymisen kannalta.

Avainsanat sähköauto, sähkönjakelu, suunnittelu, pienjänniteverkko.

Technology, Communications and
Transportation
Electrical power Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Aleksi Sieppi	Year	2017
Supervisor	Seppo Penttinen, B.Eng.		
Commissioned by	Rovakaira Oy, Marko Haaranen, M.Sc		
Subject of thesis	The effects of increasing number of electric cars in low-voltage grid network		
Number of pages	41+0		

Electric cars have become more common in Finland thanks to technological advances in the last few years. Due to the low fossil fuel emissions of electric cars, Finland's energy and climate strategy has presented a plan to increase the number of electric cars to 250 000 by the year 2030.

The purpose of this thesis was to study the effects of increasing number of electric cars in the low voltages grid of Rovakaira Oy. The experiment of this thesis was to determine the current load of low voltage grid networks and to simulate its growth when the machine is being charged by using a power point outlet. The durability in the low voltage grid network was observed in stages, when 30, 50 and 100 percent of customers begins to charge their electric cars simultaneously. The experiment was conducted by using the customer's accurate power consumption measurements from AMR devices in the year 2016.

The thesis focuses on electric car technology and its development, the variation between the electric vehicles and their charging methods as well as the basic structure of low voltage grid and its protection methods against short-circuit current. Due to the present electricity distribution network's infrastructure, the effectiveness of low voltage grid short-circuit protection system was examined when electric car's low current charging method was used in the grid.

The results of the study give the baseline information relevant to the design and development of the low-voltage network in the future. Based on this research the electric distribution company will determine, whether the low voltage networks of future renovations in the case of electric cars is profitable. The thesis used both literal and online publications as the source of information.

Key words electric car, electricity supply, planning, low voltage grid network.

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	8
2 TÄYSSÄHKÖ- & HYBRIDIAUTO	9
2.1 Täyssähköauto BEV	9
2.2 Hybridiauto HEV	9
2.3 Sähköautojen yleistyminen Suomessa	10
2.4 Sähköautojen hyödyt	10
2.4.1 Vähäiset ympäristövaikutukset	10
2.4.2 Sähköauton moottorirakenne	11
2.4.3 Sähköauton latausvirran sunnanvaihto V2G	11
2.4.4 Ajoneuvon alhaiset omistus- ja kulutuskustannukset	11
2.5 Sähköauton haitat	12
2.5.1 Heikko energiatiheys ja kalliit hankintakustannukset	12
2.5.2 Ympäristövaikutukset ajomatkaan	12
2.5.3 Vähäiset julkiset latauspisteet Suomessa	12
3 AKKUTEKNIikka	14
4 SÄHKÖAUTOJEN LATAUSTEKNIikka	16
4.1 Sähköajoneuvojen lataustavat kotitalouksessa	16
4.2 Sähköajoneuvojen latausmenetelmät	18
4.2.1 Lataustapa 1. Pienien sähköajoneuvojen lataus	18
4.2.2 Lataustapa 2. Sähköajoneuvon tilapäinen lataus	19
4.2.3 Lataustapa 3. Sähköajoneuvojen peruslataaminen	20
4.2.4 Lataustapa 4. Sähköajoneuvojen pikalataus	21
5 SÄHKÖVERKON RAKENNE	22
5.1 Kantaverkko	22
5.2 Keskijänniteverkko	22
5.3 Pienjänniteverkko	23
6 SÄHKÖAUTOJEN VAIKUTUKSET PIENJÄNNITEVERKKOON	24
6.1 Tesla Model S 75	25
6.2 Terminen kestoisuus P_{term} sekä kuormitusaste $k\%$ muuntajassa ja runkojohdosta	26
6.3 Jännitteenalenema $Uh\%$	27

7 SÄHKÖAUTOJEN VAIKUTUKSET HAJA-ASUTUSALUEELLA.....	29
7.1 Haja-asutusalueen pienjänniteverkon huipputeho	30
7.2 Haja-asutusalueen runkojohdon suojaus ja jännitteenalenema	31
7.3 Jakelumuuntajan kuormitettavuus haja-asutusalueella.....	32
8 SÄHKÖAUTOJEN VAIKUTUKSET TAAJAMILLA	33
8.1 Taajama- alueen muuntopiirin kuormitettavuus	34
8.2 Taajama - alueen runkojohdon suojaus ja jännitteenalenema	35
8.3 Jakelumuuntajan kuormitettavuus taajama- alueella	36
9 TULOSTEN ARVIOINTI.....	37
9.1 Johtimen kuormitusaste	37
9.2 Jännitteenalenema	38
9.3 Jakelumuuntajan kuormitus	39
10 POHDINTA	40
LÄHTEET	41

ALKUSANAT

Haluan kiittää opinnäytetyön mahdollisuudesta Rovakaira Oy:tä. Erityiskiitos Rovakaira Oy:n diplomi-insinöörille Marko Haaraselle työn ohjauksesta.

Kiitokset myös Lapin ammattikorkeakoulun opinnäytetyön ohjaajalle Seppo Penttiselle.

Rovaniemi 28.11.2017

Alexi Sieppi

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

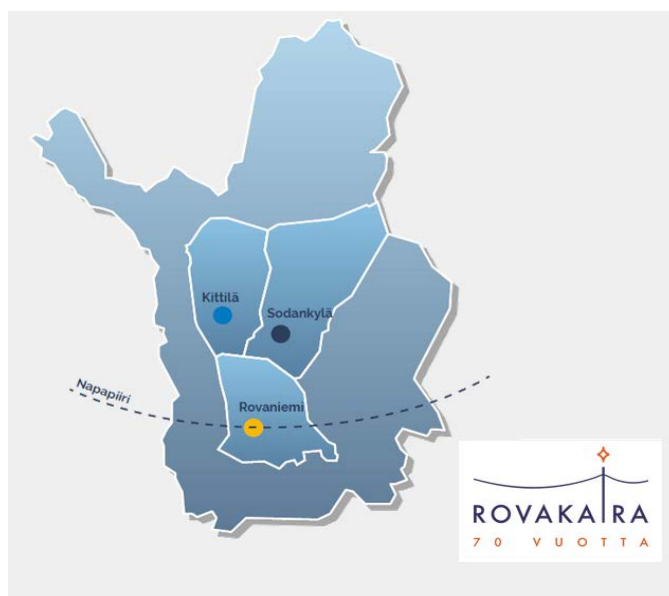
AMR	Automatic Meter Reading, Etäluettava sähkömittari
BEV	Battery Electric Vehicle, täyssähkö ajoneuvo
$\cos\varphi$	Tehokerroin, 0,95
EV	Electric Vehicle, sähköauton yleisesti käytetty nimitys
HEV	Hybrid Electric Vehicle, sähköhybridi ajoneuvo
I_L	Sähköajoneuvon latausvirta
I_{jmax}	Johdon sallittu maksimivirta
JM	Jakelumuuntamo
K_j	Keskijänniteverkko
$k_J\%$	Johdon kuormitusaste
PHEV	Plug in - Hybrid Electric Vehicle, Ladattava sähköhybridi ajoneuvo
P_j	Pienjänniteverkko
$P_{J_{term}}$	Johdon sallittu terminen kestoisuus
P_L	Sähköajoneuvon latausteho
$U_{h\%}$	Jännitealenema
VTJ	Verkkotietojärjestelmä
V2G	Vehicle to grid, kaksisuuntainen latausmenetelmä, jolla voidaan syöttää sähköauton sähköenergia takaisin sähköverkkoon.

1 JOHDANTO

Sähköajoneuvojen käyttö on kasvanut Suomessa viimeisen vuosikymmenen aikana. Vähäisen hiilidioksidipäästöjen ja energiakulutuksen takia sähköautojen käyttöä on suositeltu energiateollisuudessa fossiilipolttoaineita käyttävien ajoneuvojen sijaan.

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia sähköautojen latauksen kuormituksen vaikutuksia sähkönlaatuun Rovakaira Oy:n pienjänniteverkossa. Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, miten nykyhetken pienjänniteverkko kestäisi sähköauton latauksen, jos 30,50 ja 100 % muuntamon asiakaista hankkisi sähköauton. Lisäksi tutkimuksessa selvitetään, onko pienjänniteverkon ylитоittaminen sähköautojen latauksen kannalta teknillistaloudellisesti kannattavaa.

Kuvassa 1 voidaan nähdä Rovakaira Oy:n jakeluverkko alue sekä toimipisteiden sijainnit Suomessa. Rovakaira Oy on vuonna 1947 perustettu sähköverkkoyhtiö, jonka toimintapisteet ja jakeluverkko sijaitsevat Rovaniemen, Kittilän ja Sodankylän alueilla. Jakeluverkkoa on yhteensä noin 6500 kilometriä, josta 3400 kilometriä koostuu keskijänniteverkosta ja 3100 kilometriä pienjänniteverkosta. Lisäksi jakeluverkossa sijaitsee kaiken kaikkiaan noin 2500 jakelumuuntamo ja noin 30 000 asiakasta. (Rovakaira 2017.)



Kuva 1. Rovakaira Oy:n toimipisteet. (Rovakaira 2017)

2 TÄYSSÄHKÖ- & HYBRIDIAUTO

Sähköautot voidaan jakaa moottorin ja varastolähteen perusteella kahteen kategoriaan: Täyssähköauto BEV (Battery Electric Vehicle) sekä hybridauto HEV (Hybrid Electric Vehicle). (Plug it 2017b)

2.1 Täyssähköauto BEV

Täyssähköautossa voimanlähteenä toimii yksi tai useampi sähkömoottori. Varastolähteenä ajoneuvossa toimii akusto, jota voidaan ladata pistorasiasta tai latauksen suunnitellun järjestelmän välityksellä. (Plug it 2017b)

2.2 Hybridauto HEV

Hybridisähköautossa on varustettu sähkömoottorin lisäksi polttomoottorilla esimerkiksi bensiini- tai dieselpolttoainemoottorilla, joiden tekniikkarakenteen perusteella voidaan luokitella kahteen pääluokkaan: sarjahybridi- ja rinnakkaistekniikkaan. Kahden pääluokan lisäksi on olemassa hybridi ajoneuvoja, johon on yhdistetty molemmat hybriditekniikan rakenneosia. (Linja-Aho 2012, 42- 44.)

Sarjahybridi ajoneuvossa perusrakenne koostuu polttomoottorista, generaattorista sekä sähkömoottorista. Polttoainemoottoria käytetään pyörittämään generaattoria, jonka tuottama sähköenergia varastoituu ajoneuvon akustoon. Generaattorin tuottama sähköenergia voidaan ohjata myös suoraan sähkömoottoriin, joka toimii ajoneuvon päävoimanlähteenä. (Hietalahti 2011, 22.)

Rinnakkaishybridi ajoneuvossa sähkö- ja polttoainemoottori on kytketty voimaansiirtoon rinnakkain, jolloin moottorityyppien yksittäinen tai samanaikainen käyttö on mahdollista. Sähkömoottoria voidaan esimerkiksi käyttää avustamaan ajoneuvon kiihdytyksessä. (Nevalainen 2011, 8.)

Markkinoille on tullut normaali hybridautojen lisäksi myös ladattavat hybridi ajoneuvot P- HEV (Plugt in hybrid electric vehicle), joita pystytään lataamaan täyssähköautojen lailla verkosta. Ladattavalla hybridi ajoneuvon akustoa voidaan la-

data ajon aikana moottorijarrutuksella ja polttomoottorin avulla kevyissä ajotilanteissa. Lisäksi sähkömoottoria voidaan käyttää lyhyissä ajomatkoissa ajoneuvon ainoana voimanlähteenä. (Motiva 2017b.)

2.3 Sähköautojen yleistyminen Suomessa

Liikenteen turvallisuusvirasto Traficin keräämien ajoneuvotiedostojen perusteella Suomessa on tällä hetkellä liikennekäytössä noin kolme miljoonaa henkilöautoa, joista noin 1300 ovat sähköautoja. Sähköajoneuvojen määrä on siis tällä hetkellä vielä harvinaista. Vaikka Suomessa sähköautojen käyttö polttomoottoreiden nähden vähäistä, sähköajoneuvojen määrä on kasvanut tasaisesti vuodesta 2010 lähtien. (Traffic 2017.)

Joulukuussa 2016 esitettiin hiilidioksidipäästöjen ja energiakulutuksen vähentämisen sisältyvän ilmastostrategian, jossa Suomen hiilidioksidipäästöt vähentyisivät vuoden 2005 arvojen perusteella 39 % vuoteen 2030 mennessä. Yhtenä esitettyä toimenpiteenä tulisi olemaan sähkökäyttöisten ajoneuvojen määrän kasvaminen 20 000 - 40 000:een vuoteen 2020 mennessä ja 250 000:teen vuoteen 2030. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017, 80.)

2.4 Sähköautojen hyödyt

Sähköautoilla ajetaan Suomessa keskimäärin 20 000 kilometriä vuodessa eli noin 55 kilometriä päivässä (Hietalahti 2011,36). Sähköauto sopisi ominaisuuksiensa kannalta Suomessa taajama-alueiden sekä lyhyiden, säännöllisten ajomatkojen ajamiseen.

2.4.1 Vähäiset ympäristövaikutukset

Sähköautojen yksi parhaimmista ominaisuuksista on sen vähäiset vaikutukset ympäristöön. Koska ajoneuvo saa energiansa sähkökemiallisesti akustojärjestelmästä, sähköauton moottori ei aiheuta ajamisen aikana ympäristölle haitallisia päästöjä, kuten esimerkiksi hiilidioksidia, häkää tai hiilivetyä. (Plug it 2017b.)

2.4.2 Sähköauton moottorirakenne

Sähkömoottorin ansiosta sähköautossa ei ole yhtä paljon kuluvia komponentteja kuin polttomoottorilla varustetulla autolla. Tämän seurauksena sähköautojen huolto- ja korjaustarpeet ovat vähäiset polttomoottoriin verrattuna. Lisäksi sähkömoottorin rakenteen ansiosta sähköauton ajamisessa syntyvä melutaso on pienet. (Motiva 2017c.)

2.4.3 Sähköauton latausvirran suunnanvaihto V2G

Nykyisen akku- ja latausjärjestelmien kehityksen sekä älykkään verkon ansiosta sähköauton akun lataamisen tarkoitettu latausvirran suuntaa voidaan vaihtaa, jolloin sähköautolla voidaan syöttää energiaa takaisin kiinteistöön ja sähköjakeluverkkoon. Tätä sähköautojen akkujen hyödyntämistä energiavarastona kutsutaan termillä V2G (vehicle to grid). (Helen 2017.)

2.4.4 Ajoneuvon alhaiset omistus- ja kulutuskustannukset

Suomessa vähäpäästöisten henkilöautojen hankintoja on pyritty edistämään autoverotuksen kautta. Suomen autovero on porrastettu auton ominaispäästöjen mukaisesti (CO_2/km). (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017,57.)

Autoveron lisäksi sähköauton latauskustannukset ovat huomattavasti pienemmät kuin yleisesti käytettyjen polttomoottoreiden polttoainekulutukset. Sähköauton yleinen kilometrikulutus on 0,2 kWh/km. Suomalainen ajaa kuukaudessa keskimäärin 1500 km. Sähköauton hinnan ollessa 0,10 snt/ kWh sähköauton polttoainekustannukset kuukaudessa ovat 30 euroa. Polttoainemoottorin keskimääräinen kulutus on kuusi litraa sadalle kilometrille, jolloin polttoaineenkulutus on 10 euroa sadalle kilometrille. Polttoainemoottorin kuukautiset polttoainekustannukset ovat tämän perusteella 150 euroa. (Sähköinen liikenne 2017a.)

2.5 Sähköauton haitat

Vähäisten ympäristövaikutuksista ja teknologiakehityksestä huolimatta sähköautojen suurimmat heikkoudet ovat ajoneuvojen akkujärjestelmän rakenteessa ja niiden vaikuttavista rajoituksissa (Motiva 2017c).

2.5.1 Heikko energiatiheys ja kalliit hankintakustannukset

Sähköautolla on polttomoottoreihin nähden huono energiatiheys (Motiva 2017c). Nykyisen sähköauton akun latauskapasitanssin perusteella ajoneuvon arvioitu kilometrikulutus on 0,15- 0,2 kWh/km. 25- 35 kWh akulla varustettu sähköauton kantosäde, eli maksimi ajomatka on tällöin 150–250 kilometriä. (Hietalahti 2011,36.) Jotta sähköauton kantosädettä voitaisiin suurentaa, akun energiatheyttä tulisi kasvattaa, jolloin akkujärjestelmän paino kasvaisi. Suuri ja painava akkujärjestelmä nostaa myös sähköauton arvoa. (Nevalainen, 2010, 10.)

2.5.2 Ympäristövaikutukset ajomatkaan

Sähköauton tehokulutukseen vaikuttavat ajomatkan pituuden lisäksi myös muun muassa ajotyyli, sääolosuhteet sekä sähköauton muiden elektronisten laitteiden samanaikainen käyttö, kuten esimerkiksi ilmastointi, ajovalot ja auton hallintajärjestelmät. Etenkin Suomen talviolosuhteet lisäävät akun kulutusta ajo- ja vierimisvastuksien kasvun sekä auton lämmityksen johdosta. (Motiva 2017c.)

2.5.3 Vähäiset julkiset latauspisteet Suomessa

Sähköautojen heikon yleistymisen johdosta julkiset latauspisteet ovat vähäisiä Suomessa. Sähköinen liikenne - internetsivuston keräämässä tilastossa Suomessa oli toukokuussa 2017 noin 740 julkista latauspistettä. Etenkin Pohjois-Suomen alueilla latauspisteitä on hyvin vähän ja pitkien välimatkojen etäisyydellä toisistaan. Kuvassa 2 on esitetty latauspisteiden sijainti Suomessa. (Sähköinen liikenne 2017b.)

Työ - ja elinkeinoministeriön julkaiseman valtioselinteossa julkisten latauspisteiden määrä Suomessa tulee kasvamaan energia - ja ilmastostrategian mukaisesti 2000-4000:een vuoteen 2020 mennessä 25 000:een vuoteen 2030 mennessä.



Kuva 2. Julkiset latauspisteet Suomessa. (Sähköinen liikenne 2017b)

3 AKKUTEKNIikka

Akku on sähkökemiallinen energiavarasto, joka koostuu yhdestä tai useammasta kennosta. Kenno muodostuu kahden elektrodin (anodin ja katodin) muodostamasta sähköparista. Elektrodien välissä on elektrolyytti, joka on akkurakenteen perusteella nestemäisessä tai geelimäisessä muodossa olevaa ainetta. (Motiva 2017a.)

Akun kytkettäessä virtapiiriin katodilla tapahtuu pelkistymisreaktio, jolloin katodi luovuttaa elektrodeja kennossa elektrolyytin välityksellä. Samaan aikaan anodilla tapahtuu hapettumisreaktio, jossa anodi vastaanottaa elektrodeja virtapiiriin ja siitä takaisin katodille. Tämä elektrodien siirtyminen anodista katodiin virtapiiriin välityksellä synnyttää kennossa sähkövirran. (Motiva 2017a.)

Akku ja sen ominaisuudet ratkaisevat sähköauton suorituskyvyn ja käyttökelpoisuuden. Ihanteellinen sähköauton akku täyttäisi monta eri suorituskykyehtoä. Sillä olisi suuri ominaisenergia (massan varastoima energia), suuri energiatiheys (tilavuuden varastoima energia, ja suuri ominaisteho (saatavilla oleva huipputeho). (Treatise 2006, 34.)

Akkutyypit ovat kehittyneet viime vuosien aikana voimakkaasti. Sähköautojen valmistajien vanhimpia akkutyyppejä ovat tällä hetkellä nikkeli- kadmium- pohjaiset NiCd-akut, joilla on pitkä elinikä ja suuri virranantokyky. Akkujen sisältämä kadmium on kuitenkin erittäin myrkyllistä, jonka seurauksena NiCd-akut luokitellaan ongelmajätteelliseksi materiaaliksi. (Nevalainen 2010, 10–11.)

Sähköautojen yleisin akkutyyppi on toistaiseksi nikkeli- metallihybridiseokselliset akut. NiMH - akuissa toinen elektrodi on valmistettu nikkelistä ja toinen on vety-metalliseoksesta. NiMH - akulla on suurempi akkukapasiteetti kuin NiCd-akulla, mutta sen elinikä ja virranantokyky ovat paljon alhaisemmat. NiMH - akut eivät kuitenkaan ole yhtä myrkyllisiä NiCd - akkuihin verrattuna (Motiva 2017a.)

90- luvulla alkaneiden Litium- pohjaisten akkujärjestelmien, (litium-ioni, litium-rau-
tafosfaatti, litium – titaani yms.) käyttö ja kehitys ovat yleistyneet sähköajoneuvo-
jen energialähteenä. Litium- pohjaisilla akuilla on painoluokkaansa nähden suu-
rempi akkukapasiteetti muihin akkutyypeihin verrattuna. Akun korkean koko-
naishinnan ja sen rakenteen epätasapainoisuutensa takia litiumin käyttö akuissa
yleistyi vasta 2000- luvun alussa. (Motiva 2017a.)

4 SÄHKÖAUTOJEN LATAUSTEKNIikka

Sähköajoneuvojen lataus voidaan suorittaa käyttämällä kotitaloudessa vikavirtasuojauksella varustettua yksi- tai kolmevaiheista pistorasiaa sekä ajoneuvoon suunniteltua latausjärjestelmää (Sesko 2015).

4.1 Sähköajoneuvojen lataustavat kotitalouksessa

Sähköauton lataus tapahtuu yleisesti liittämällä latausjohto sähköauton lataukseen suunnitellun pistokkeeseen ja latauspisteen pistorasiaan välille. Lataus voidaan suorittaa joko yksivaiheisella tai kolmevaiheisella syötöllä. (Hietalahti 2011,35 .)

Yksivaiheisella syötöllä latausteho voidaan laskea kaavasta 1.

$$P_L = U_V * I_L \quad (1)$$

missä

P_L	on	latausteho (kW),
U_V	on	yksivaiheisen syötön jännite (V) ja
I_L	on	latausvirta (A).

Suomessa yksivaiheisen syötön jännite on 230V. 16 ampeerin sulakkeella maksimilatausteho on 3,6 kWh. 25–35 kWh akkukapasiteetilla varustetun sähköauton latausaika on tällöin 7- 10 h.(Hietalahti 2011, 36.)

Kolmivaiheisen syötöllä käytettävän latausteho voidaan laskea kaavasta 2.

$$P_L = \sqrt{3}U_V * I_L \quad (2)$$

Kolmivaiheisen syötön jännitearvo on Suomessa 400 V. 16 ampeerin sulakkeella maksimilatausteho tulisi olemaan 11 kW. Latausaika olisi tällöin 2-3 h. (Hietalahti 2011,36.)

Taulukossa 1. on esitetty yksi- ja kolmevaihesyötön maksimilatausteho eri sulakekoolla.

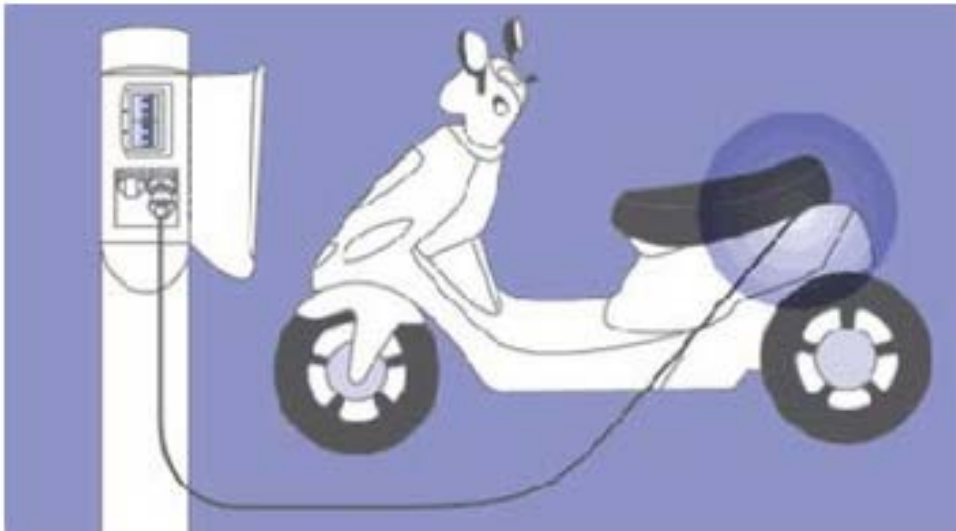
Taulukko 1. Latausteho yksi- ja kolmivaihe pistorasiasta (Hietalahti 2011, 36).

Sulakekoko	1. vaihepistorasia, 230V	3.vaihepistorasia 400/230V
10	2,3 kW	6,9 kW
16	3,6 kW	11,1 kW
25	-	17,3 kW
32	-	22,2kW

4.2 Sähköajoneuvojen latausmenetelmät

Sähköajoneuvojen latausmenetelmät ovat Suomen standardisoimisliiton julkaiseman SK69 - ohjeistuksen mukaan jaettu neljään pääkategoriaan; kevyiden ajoneuvojen latausmenetelmä sekä sähköautojen hidas, perus ja pikalatausmenetelmät. Menetelmät perustuvat muun muassa latauskohteeseen, latausmenetelmään sekä lataukseen tehoon ja virtaan.

4.2.1 Lataustapa 1. Pienten sähköajoneuvojen lataus



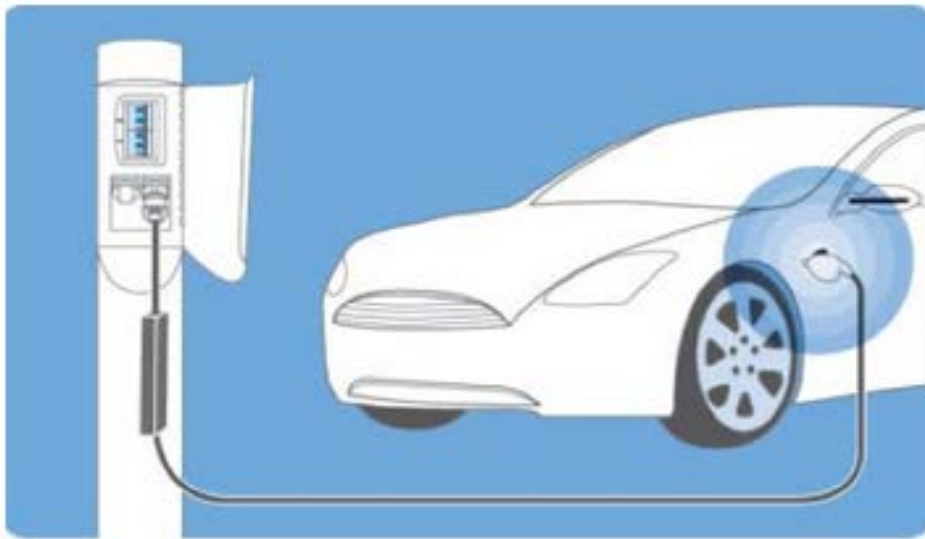
Kuva 3. Pienten sähköajoneuvojen latausmenetelmä (Plug it 2017a)

Kuvassa 3 esitetään keveiden sähköajoneuvojen latausmenetelmä. Kyseinen lataustapa on tarkoitettu pienten sähköajoneuvojen muun muassa sähköpyörien ja skoottereiden lataukseen pistorasian välityksellä. Sähköajoneuvoa ladataan maksimissaan 16 A virralla 230 V yksivaiheisella syötöllä. Pistorasia tulee olla suojattu enintään 30 milliampeeria vikavirtasuojauksella. (Sesko 2015.)

4.2.2 Lataustapa 2. Sähköajoneuvon tilapäinen lataus

Lataustapa 2. on tarkoitettu sähköautojen väliaikaiseen ja rajoitettuun lataukseen. Lataus suoritetaan samalla tavalla kuin edellä mainittu piensähköajoneuvojen lataaminen eli pistorasian välityksellä. Sähköauton suurin sallittu latausvirta on kuitenkin yleisesti sallittu 32 A. (Sesko 2015.)

Sähköauton lataus hitaalla menetelmällä voidaan suorittaa myös lämmitystolppien välityksellä. Lämmitystolppien käyttö sähköautojen latauksessa toimisi esimerkiksi kerros - ja rivitaloissa, kun lämmitystolppaan on asennettu energialuentamittari. Lisäksi auton lämmitykseen tarkoitettu ajastin on otettava pois käytöstä latauksen ajaksi. (Plug it 2017a.)

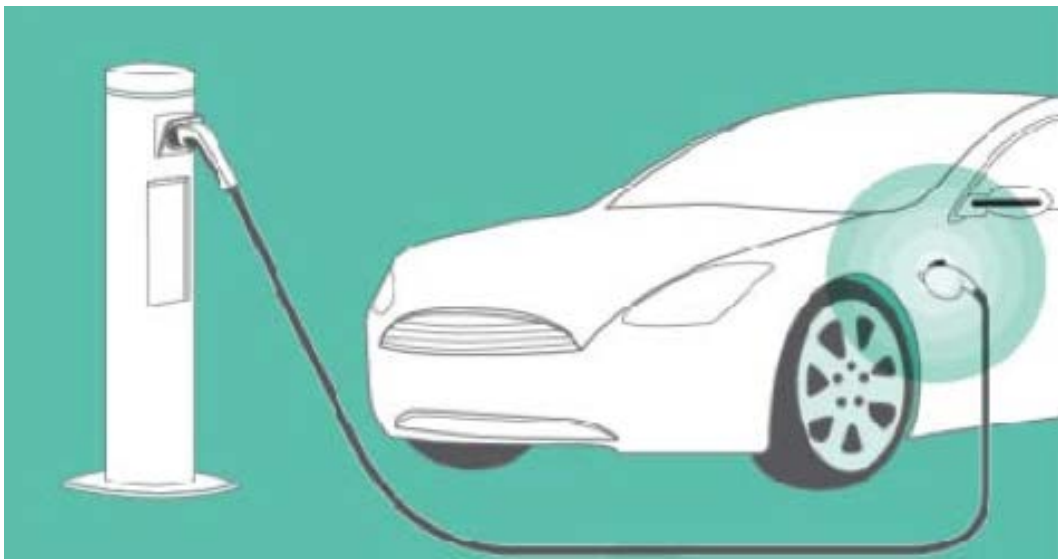


Kuva 4. Sähköautojen tilapäinen latausmenetelmä (Plug it- 2017a)

Kuva 4 esittää sähköauton tilapäistä latausmenetelmää. Latauksessa käytettävä kaapeli on varustettu ohjaus - ja suojauslaiteella, jolla voidaan rajoittaa latausvirtaa riittävän pieneksi esimerkiksi 8 - 10A. Hitaan latausmenetelmän latausteho on yleisesti 2000 W. (Sesko 2015.) Vaikka hidaslataus on tarkoitettu tilapäiseen lataukseen, sähköauto on yleensä varustettu lataukseen tarkoitetulla latausjohdolla (Plug it 2017a).

4.2.3 Lataustapa 3. Sähköajoneuvojen peruslataaminen

Lataustapa 3. on sähköajoneuvojen varsinainen latausmenetelmä. Sähköajoneuvo liitetään latauksen aikana vaihtosähköverkkoon käyttäen lataukseen suunniteltua järjestelmää. Tällä järjestelmällä voidaan latauksen aikana suorittaa myös ohjaus- ja valvonta toimintoja, joilla voidaan ohjata esimerkiksi kuormitusta ja V2G- toimintoja. (Sesko 2015.)

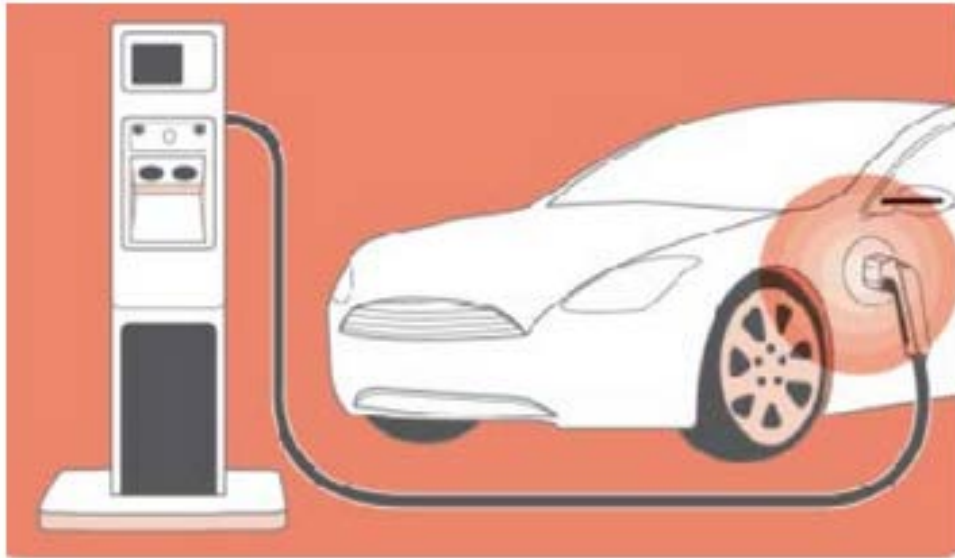


Kuva 5. Sähköauton lataus perusmenetelmällä (Plugit - 2017b)

Kuvassa 5 esitetään sähköauton varsinainen latausmenetelmä. Kyseisessä latausmenetelmällä latausvirta on yleisesti 6 - 63 A, mikä vastaa lataustehoa 1,4 - 43 kW. (Sesko 2015.)

4.2.4 Lataustapa 4. Sähköajoneuvojen pikalataus

Sähköajoneuvon akustoa syötetään tasasähköllä suurella virralla auton ulkopuolella olevasta tasasähkölaturista. Latausjärjestelmällä saavutetaan maksimissaan 200 ampeerin latausvirta, mikä vastaa tehoina 50 kW.(Sesko 2015.)



Kuva 6. Sähköauton teholatausmenetelmä (Plug it 2017a)

Kuvassa 6 esitetään sähköauton pikalatausmenetelmä. Puolen tunnin pikalatauksella sähköauton akku voidaan ladata 80 prosentin varaukseen. Kaikki sähköajoneuvot eivät kuitenkaan ole suunniteltu käyttämään pikalatausta. (Plug 2017a.)

5 SÄHKÖVERKON RAKENNE

Sähkönjakelujärjestelmän tehtävänä on siirtää sähkövoimansiirtojärjestelmän kautta tuleva tai jakeluverkkoon liitettyjen voimalaitosten tuottama sähkö loppukäyttäjille. Sähkönjakelujärjestelmän osia ovat 110 kV ja 45 kV jännitetason alueverkko, 110/20 kV ja 45/20 kV jännitetason muuntavat sähköasemat, 20 kV jännitteen keskijänniteverkko, 20/0,4 kV jännitteentason jakelumuuntamot sekä 0,4 kV jännitteen pienjänniteverkko. (Lakervi & Partanen 2008, 11.)

5.1 Kantaverkko

Suomen sähkösiirtojärjestelmä koostuu yli 100 sähköasemasta sekä noin 14 000 kilometrin kattavasta voimajohtorakenteesta, jotka jakautuvat 440, 220, ja 110 kV jännitetasoille. Kantaverkko on sähkönsiirron runkoverkko, johon suuret voimalaitokset ja tehtaot sekä alueelliset jakeluverkot on liitetty. (Fingrid 2017.)

Fingrid Oyj on yritys, joka on vastuussa Suomen kantaverkon valvonnasta, suunnittelusta, verkon ylläpidosta, rakentamisesta ja kehittämisestä sekä sähkömarkkinoiden toiminnan edistämisestä. (Fingrid 2017.)

5.2 Keskijänniteverkko

Keskijänniteverkkoon kuuluvilla sähköasemilla muutetaan yleisesti 110 kilovoltti 20 kilovoltin jännitetasoon. Joissakin keskijänniteverkon osissa, kuten esimerkiksi kaupungeissa käytetään myös 10 kilovoltin jännitetasoa. (Lakervi & Partanen 2008, 125.)

Sähköasema on sähköjakeluverkon tärkein yksittäinen rakenneos, sillä sen sijainnilla ja koolla on merkittäviä vaikutuksia keskijänniterunkojohtojen pituuteen, mitoittamiseen ja varayhteyksiin. Sähköasema koostuu suurjännitelaitoksesta, yhdestä tai useammasta päämuuntajasta, keskijännitekytkinlaitoksesta sekä apujännitejärjestelmästä. (Lakervi & Partanen, 2008, 119.)

Keskijänniteverkon johdon lähtö sähköasemalta suojataan yleisesti ylivirta-, maasulku-, tai jälleenkytkentäreleillä varustetulla katkaisijalla. Kj-verkko rakennetaan

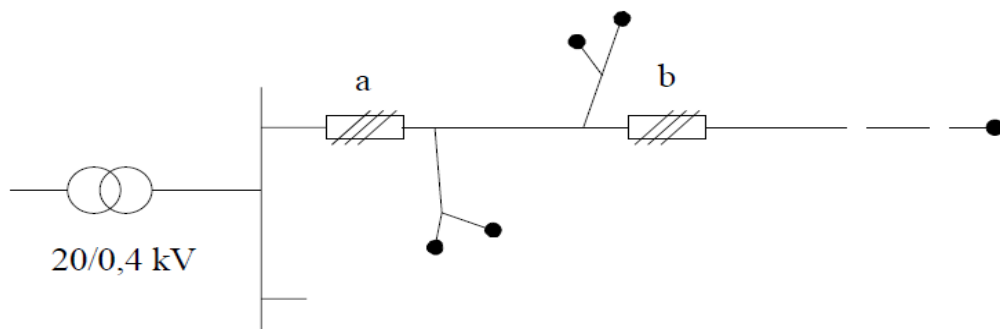
suurelta osin rengasmaiseksi, mutta sitä käytetään säteisenä. (Lakervi & Partanen, 2008, 119 – 125.)

5.3 Pienjänniteverkko

Pienjänniteverkot koostuvat muuntamoista, suojauksesta ja johtimista. Muuntamoita on olemassa erityyppisiä, kaupunkialueilla puisto- tai kiinteistömuuntamoita ja haja-asutusseudulla pylväsmuuntajia. Pienjänniteverkkoa käytetään samalla tavalla kuin keskijänniteverkkoa, eli säteisenä. Pj - verkolla on yksi syöttöpiste, joka alkaa 20/0,4 kV jakelumuuntamosta (Lakervi & Partanen 2008, 158.)

Yleisin pienjännitejakeluverkon vikavirtasuojalaiteena käytetään varoketta. Varoke sijoitetaan jakelumuuntamolle kunkin lähdön kaikkiin vaihejohtimiin ja sen sulake mitoitetaan siten, että se kestää hetkellisen kuormitusvirran. Sulakkeen tulee kuitenkin toimia riittävän nopeasti, verkoston loppupäässä tapahtuvan yksivaiheisesta oikosulusta aiheutuvien vahinkojen estämiseksi. Jos näitä vaatimuksia ei pystytä toteuttamaan, pienjännitejohto tulee vaihtaa poikkipinta - alaan nähden suurempaan tai nykyiseen johtoon tulee asentaa välisulakkeita. (Lakervi & Partanen, 2008, 163.)

Kuvassa 7 on esitetty pienjänniteverkon varokkeen toimivuus. Kuvassa esitetty välisulake (b) on valittu käyttöpaikan nimellisvirtaa pienemmäksi ja muuntamon lähtöjen sulake (a) on valittu verkon kuormituksen perusteella. (Lakervi & Partanen 2008, 163.)



Kuva 7. Pienjänniteverkon suojausjärjestelmä (Lakervi & Partanen 2008, 163)

6 SÄHKÖAUTOJEN VAIKUTUKSET PIENJÄNNITEVERKKOON

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia sähköauton päivittäisen hitaan latausmenetelmän vaikutuksia Rovakaira Oy:n pienjänniteverkkoon. Menetelmään päädyttiin, koska Suomessa on hitaaseen lataukseen perustuva infrastruktuuri valmiina, eikä autojen hankinta aiheuta haltijalle lisäinvestointeja. Nopeammissa lataustavoissa sähköauton haltija joutuisi hyvin todennäköisesti suurentamaan sähköliittymänsä kokoa, jolloin sähköverkon näkökulmasta verkko mitoitettaisiin uudelleen.

Tutkimuksessa tarkastellaan 41 pienjänniteverkkoa, josta 22 sijaitsee haja-asutusalueella. Nämä Pj-verkot kattavat asiakasmäärältään noin 1 % Rovakaira Oy:n haja-asutusalueiden jakeluverkosta. Taajama-alueiden 19 Pj- verkkoa kattavat kaiken kaikkiaan noin 6 % jakeluverkon taajama-alueiden asiakasmäärästä.

Pj-verkon suojauksen tarkastelu keskittyy kolmeen suuntaukseen: runkojohdon ja jakelumuuntajan terminen kestoisuus pj-verkon kuormituksen kasvaessa, sulaketoimivuus sekä jännitteenaleneman suuruus verkon kaukaisemmalta käyttöpaikalta. Opinnäytetyössä keskitytään tutkimaan sähköautojen yleistymisen vaikutuksia erikseen haja-asutus- ja taajama-alueilla. Tutkimuksessa käytetään pienjänniteverkon asiakkaiden todellisia tuntiteho-mittausarvoja vuodelta 2016.

Opinnäytetyössä oletetaan, että pienjänniteverkon sähköautoja ajettaisiin Pohjois-Suomen alueella vuodessa 25 550 km, eli 70 km päivässä. Sähköauton päivittäinen energiankulutus tulee tällöin olemaan 14 kW, kun auton kilometrikulutus 0,2 kWh/km. Lisäksi oletetaan, että sähköautojen lataus suoritettaisiin päivittäin klo 16–20 välisenä aikana.

6.1 Tesla Model S 75



Kuva 8. Tesla Model S- sähköauto (Tesla 2017)

Kuvassa 8 on esitetty vuoden 2017 Tesla Model S-henkilöauto. Tässä opinnäytetyössä käytetään tutkimuspohjana Tesla model S75 - sähköauton teknisiä tietoja sähköautojen yleistymisen vaikutuksista pienjänniteverkon toimivuuteen. Teslan tekniset lataustiedot on esitetty taulukossa 2. yksivaiheisen syötön välityksellä. Edellä mainittu sähköauton päivittäiskulutus ratkaistaan Tesla Model S lataustietojen perusteella. (Tesla 2017)

Taulukko 2. Tesla Model S75 - Lataustiedot (Tesla 2017)

Jännite V	230
Akkukapasiteetti (kWh)	75
Latausteho PL (kWh)	3
Latausvirta IL (A)	13
Huippunopeus km/h	225
Kilometri kulutus kW/km	0,2

6.2 Terminen kestoisuus P_{term} sekä kuormitusaste $k\%$ muuntajassa ja runkojohdosta.

Pienjänniteverkon runkojohdon valinta perustuu verkon suunnitteluvaiheessa lähdön arvioidun huipputehon arvoon ja pituuteen. Johdon maksimitehonsiirto määräytyy sen termisen kestoisuuden perusteella (Lakervi & Partanen 2008, 67-68, 74,). Johdon termisen kestoisuus voidaan ratkaista kaavasta 3.

$$P_{J\max} = \sqrt{3} \times U \times \cos \varphi \times I_{J\max} \quad (3)$$

jossa

U	on	kolmivaihe jännite 0,4 kV,
$\cos \varphi$	on	tehokerroin 0,95 ja
$I_{J\max}$	on	johdon sallittu maksimaalivirta.

Kuormitusaste $k\%$ tarkoittaa pj- verkon osan tai komponentin hetkellisen kokonaistehon kuormittavuutta sen termisen tehokestoisuuteen tai nimellistehoon nähden. Tehon kasvaessa yli johdon termisen kestoisuuden voi aiheuttaa johdon mekaanisen rakenteen (suojaeristyksen, johtimien yms.) vahingoittumista sekä sähkösiirron ja laadun heikentymistä.

Runkojohdon kuormitusaste $k_j\%$ voidaan ratkaista käyttämällä kaavaa 4.

$$k_j\% = \frac{P_n + n P_L}{P_{J\max}} \quad (4)$$

jossa

P_n	on	runkojohdon tutkittava osan kokonaisteho,
n	on	sähköautojen määrä tutkittavalla runkojohdolla ja
P_L	on	sähköauton latausteho.

Pienjännite verkon jakelumuuntajan kuormitusten muutoksia tarkastellessa verrataan verkon huipputehoa muuntajan nimellistehoarvoon. Kuormitustehon kasvaessa yli muuntajan sallitun arvon muuntajan lämpötila kasvaa ja näin ollen muuntajan elinikä lyhenee. Muuntajan kuormitusaste pienjänniteverkossa saadaan ratkaistua kaavasta 5.

$$k_T \% = \frac{P_{\text{Max}}}{S_K} \quad (5)$$

Jossa

P_{max} on pj-verkon huippukuorma ja

S_K on muuntajan nimellisteho.

Muuntajan suurin sallittu ylikuormitus 20 celsiusasteen lämpötilassa on 30 prosenttia muuntajan nimellistehosta. (Elovaara & Haarla 2011,158.)

6.3 Jännitteenalenema $U_h\%$

Jännitteenalenemalla tarkoitetaan jännitehäviötä, joka syntyy 20 kV:n muuntajan ja kulutuspaikan välisen johtoreitin impedansseissa riippuen johdossa siirrettävästä tehosta. Laitteen toimivuus sähköverkossa heikkenee, jos jännitetason suuruus on liian alhainen tai liian korkea. Tästä johtuen jännitealeneman suuruus sähköön kulutuspaikassa on yksi verkostosuunnittelun tärkeimmistä reunaehdoista (Lakervi & Partanen, 2010,38)

”Standardi SFS - EN 50160 määrittää, että normaaleissa käyttöolosuhteissa pienjännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvojen tulee olla välillä +10%...-15 % (25 3195 V). Standardi on väljä salliessaan näin suuren jännitteen vaihteluvälin. Lisäksi standardissa puhutaan 10 minuutin keskiarvosta, joka tarkoittaa, että jännitteenalenema voi olla hetkellisesti jopa tätä suurempi. Sähköala onkin määritellyt ohjeellisenä kyseistä standardia tiukemmaksi jännitteen vaihtelurajaksi +6 %...- 10 %” (Haaranen 2011, 14). Pienjänniteverkon jännitealenema johtimen loppupäästä voidaan ratkaista kaavasta 6 (Lakervi & Partanen 2008, 24.)

$$U_h\% = |U_1| - |U_2|$$

$$\approx IR\cos\varphi + IX\sin\varphi, \quad (6)$$

jossa

I on virta,

R on johtimen resistanssi,

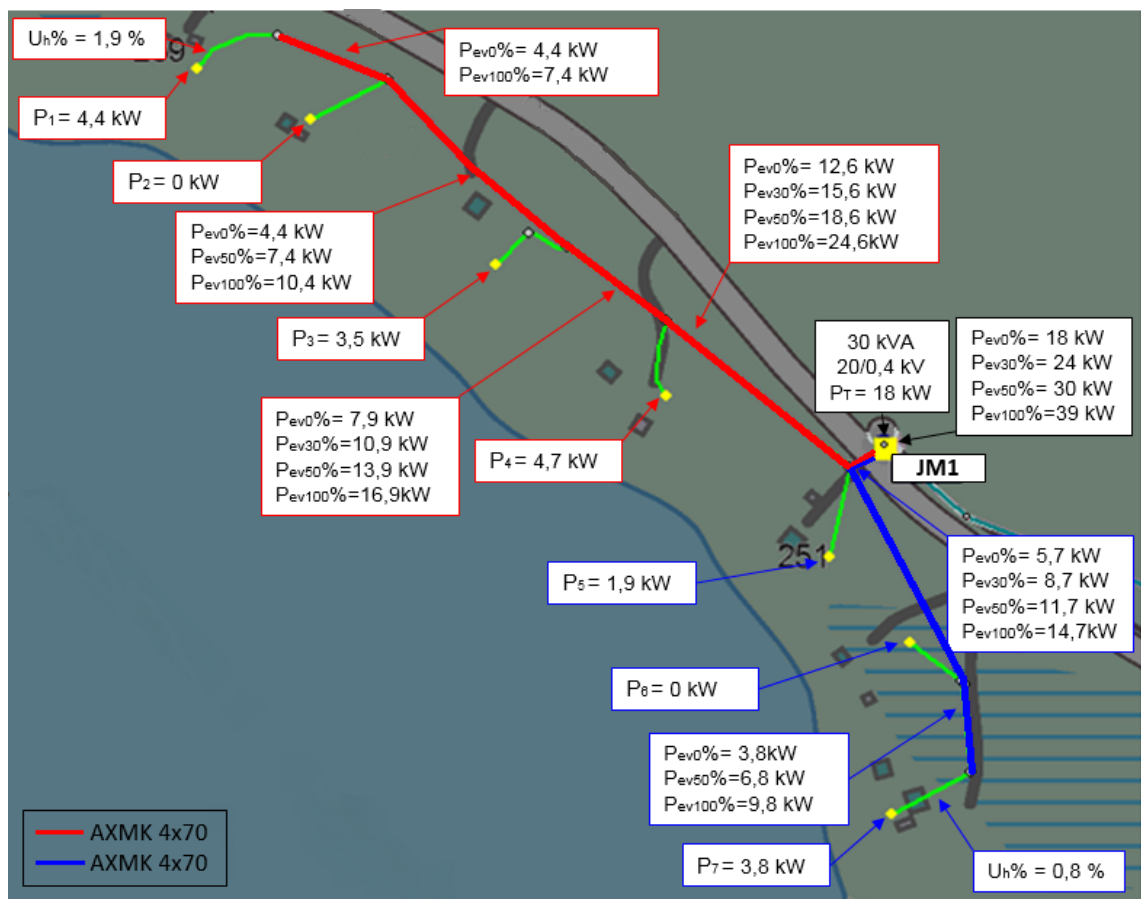
X on johtimen reaktanssi ja

φ on tehokerroin.

7 SÄHKÖAUTOJEN VAIKUTUKSET HAJA-ASUTUSALUEELLA

Haja-asutusalueilla etäisyydet ovat pitkiä ja verkko on varsin kevyessä kuormassa, joten sähköautojen yleistymisen aiheuttamat ongelmat liittyvät useimmiten sähkön laatuun verkon kuormitettavuuden sijasta. Tutkimuksessa tarkastellun haja-asutusalue esimerkki verkon haarajohto sijaitsee noin 50 km päässä syöttävältä sähköasemalta. Verkko-osa on varsin harvaanasuttua ja pääosan verkon kuormituksesta muodostavat vapaa-ajan asunnot. Harvasta astutuksesta johtuen myös verkkopituudet ovat pitkiä ja Pj - runkojohdot vahvasti mitoitettuja jännitteenaleneman minimoimiseksi.

Kuvassa 9 on esitetty tarkastellun verkko-osan kauimmaisen muuntamon pj-verkko sekä sähköautojen latauksen vaikutukset verkkoon kuormituksen kannalta. Kuvaan on myös lisätty haarojen kaukaisimman käyttöpaikan jännitealenema normaalitilassa.

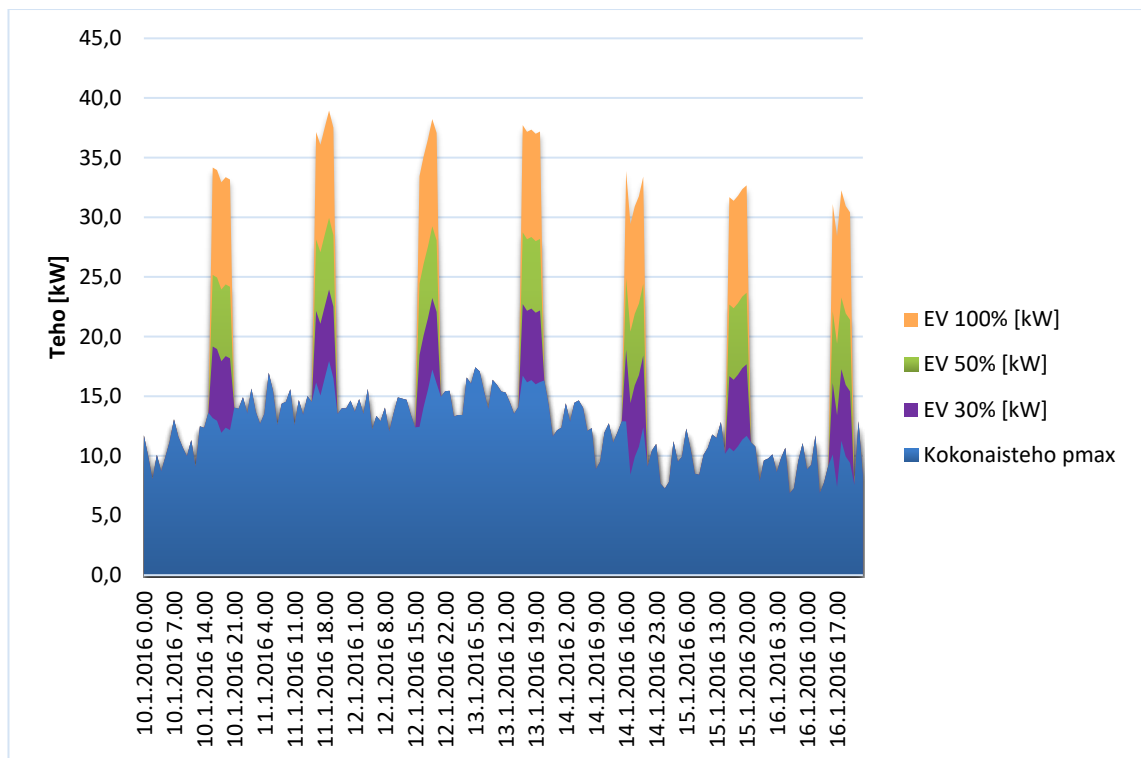


Kuva 9. Haja-asutusalueen esimerkkiverkon kuormituskasvu

Muuntamo on kahden AXMK 4X70 - runkojohtimen muodostamaa pienjänniteverkko. Käyttöpaikat alueella ovat yleisesti loma-asustukseen kuuluvia rakennuksia, jossa energiankäyttö on vähäistä.

7.1 Haja-asutusalueen pienjänniteverkon huipputeho

Tässä tutkimuksessa haluttiin simuloida verkkoyhtiön kannalta kaikkein huonointa tilannetta, jossa pj-verkon kaikki käyttöpaikat lataisivat sähköautoa samanaikaisesti. Kuviossa 1 on esitetty sähköautojen latauksen vaikutukset esimerkki-verkossa vuoden suurimman kuormituksen kattavan viikon aikana.

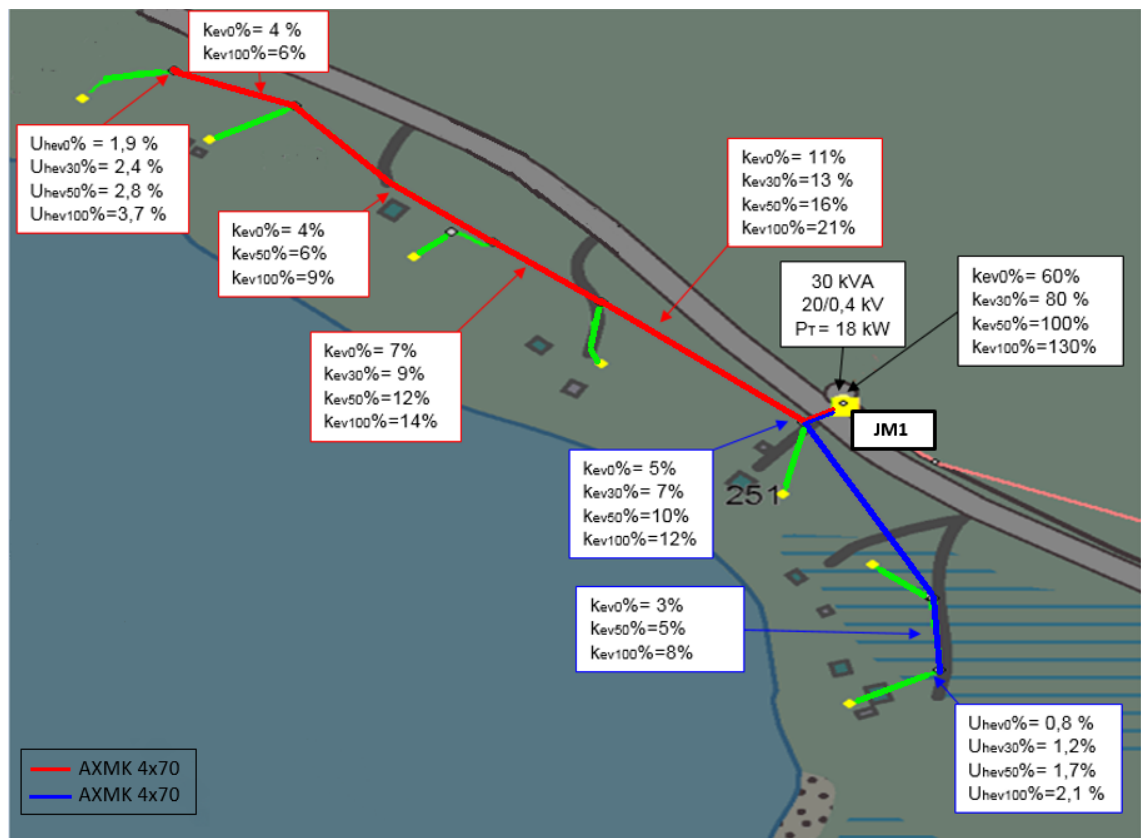


Kuvio 1. Haja-asutusalueen sähköautojen latauksen vaikutukset huipputehoon.

Kuviosta 1 huomataan, että sähköautojen samanaikainen lataus kaikissa käyttöpaikoissa nostaa verkon kokonaistehoa puolella. Tämä tilanne on kuitenkin lähinnä teoreettinen, sillä todellisuudessa autojen yleistymisen lähitulevaisuudessa 100 % on epätodennäköistä eikä lataus tällöinkään tapahtuisi yhtäaikaaisesti.

7.2 Haja-asutusalueen runkojohdon suojaus ja jännitteenalenema

Tarkastellaan haja- asutusalueen sähköautojen yleistymisen vaikutuksia pienjänniteverkon suojauksen kannalta. Kuvassa 10 on esitetty tarkastellun verkko osan kauimmaisen muuntamon pj-verkko, kuormituksen sekä jännitteenaleneman tila, kun sähköautojen yleistyminen verkossa on 30, 50 ja 100 %.



Kuva 10. Haja-asutusalueen esimerkkiverkko johtimien kuormitusaste kj% ja jännitteenalenema Uh%

Kuvasta 10 voidaan huomata, että johto-osuuksien maksimikuorman osuus kuormitettavuudesta on vain murto-osa maksimikuormitettavuudesta, eikä jännitteenaleneman kanssa ole ongelmia.

Tutkitaan pienjänniteverkon suurinta kuormittavaa haaraa. Tilanteessa, jossa sähköautoja ei ole, haaran mitattu teho on 12,6 kW, mikä vastaa 19,1 A virtaa. Runkojohto on riippukierrekaapeli AMKA 4x70, jonka terminen kestoisuus on 118,5 kW ja maksimivirta 180 A. Mitattu teho kuormittaa runkojohtoa kaavan 4. perusteella 11 %. Pisimmän käyttöpaikan jännitteenalenema noin 1,9 % mikä on

vielä sallitun vaihteluvälin $\pm 10\%$ sisällä. Pienjänniteverkon osa on tässä tilanteessa mitoitettu oikein.

Kun haaran kaikki käyttöpaikat lataavat sähköautoja samanaikaisesti, haaran teho on tällöin 24,6 kW. Runkojohdon kuormitusaste nousee tässä tilanteessa 21 %:iin ja virta 35,5 A. Runkojohdon sulakkeen koko on 63 A, jolloin sähköautojen lataus ei aiheuta ongelmia runkojohdon suojauksessa. Jännitealenema kaukaisimmassa käyttöpaikassa nousee 3,7 %:iin, mikä on hyväksyttävä. Tällä perusteella pienjänniteverkon osa kestää kaikkien käyttöpaikojen sähköauton latauksen.

Kuvasta 5 huomataan, että sähköautojen yleistymisen aiheuttamat vaikutukset sähköverkolle alkavat näkyvä vasta autojen yleistymisen lähestyessä 100 %:ia. Pienjänniteverkon mitoitus on suoritettu siten, että verkko kestää kaikkien käyttöpaikkojen samanaikaisen sähköautojen latauksen.

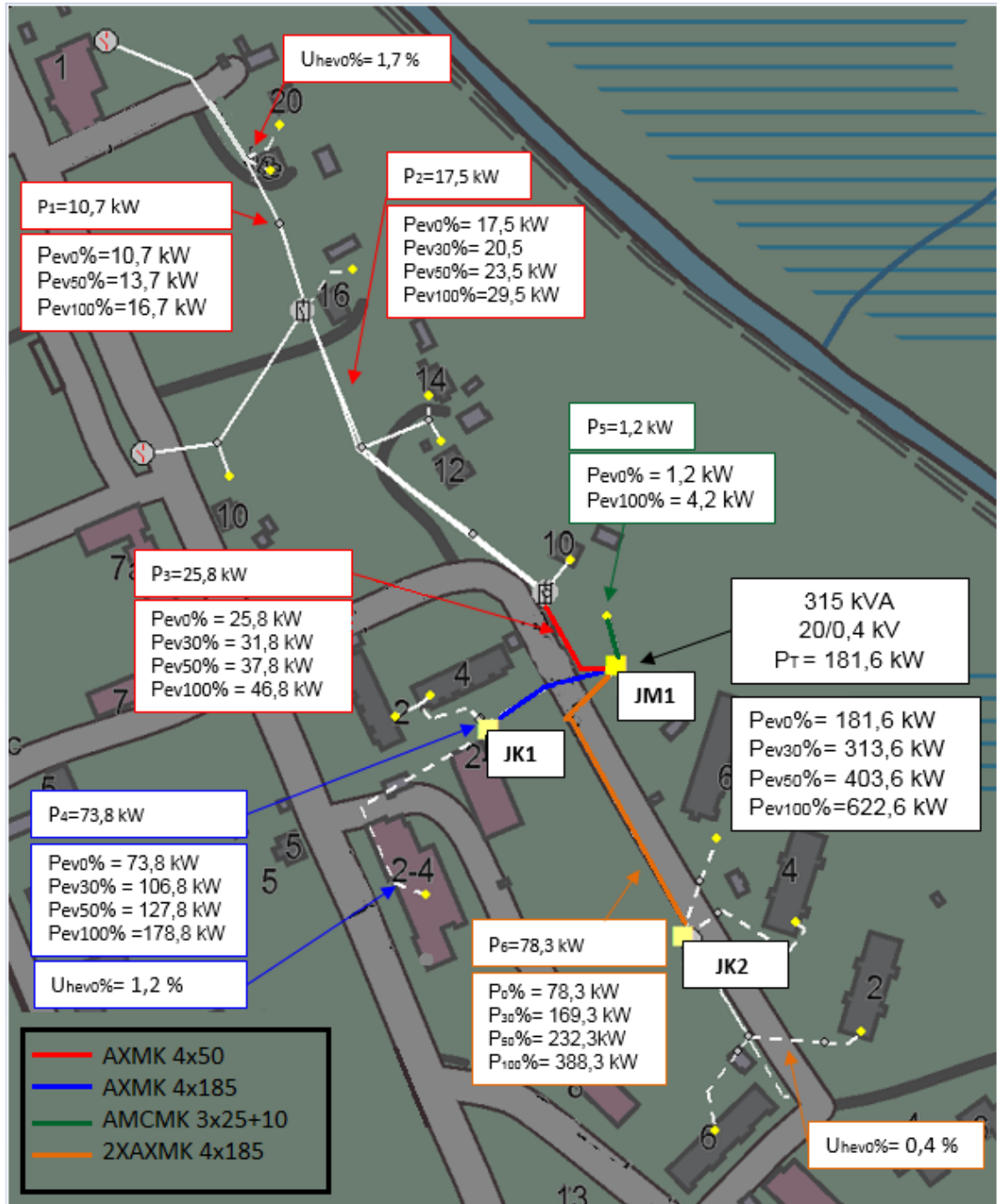
7.3 Jakelumuuntajan kuormitettavuus haja-asutusalueella.

Tarkastellaan koko pienjänniteverkon kuormituksen vaikutuksia jakelumuuntamoon JM1:seen. Muuntamo on varustettu 30 kVA jakelumuuntajalla. Pienjänniteverkon normaalitilanteessa mitattu teho on 18 kW. Kaavan 5 perusteella pienjännitteen mitattu teho kuormittaa jakelumuuntajaa 60 %. Jakelumuuntaja on siis mitoitettu oikein.

Sähköautojen latauksen suorittaminen kaikilla käyttöpaikoilla samanaikaisesti nostaa pienjännitteen huipputeho 39 kW:iin. Tässä tilanteessa pienjännitteen huipputeho kuormittaa jakelumuuntajaa sen nimellistehoon nähden 130 %. Kuormitus on muuntajan sallittujen rajojen rajalla.

8 SÄHKÖAUTOJEN VAIKUTUKSET TAAJAMILLA

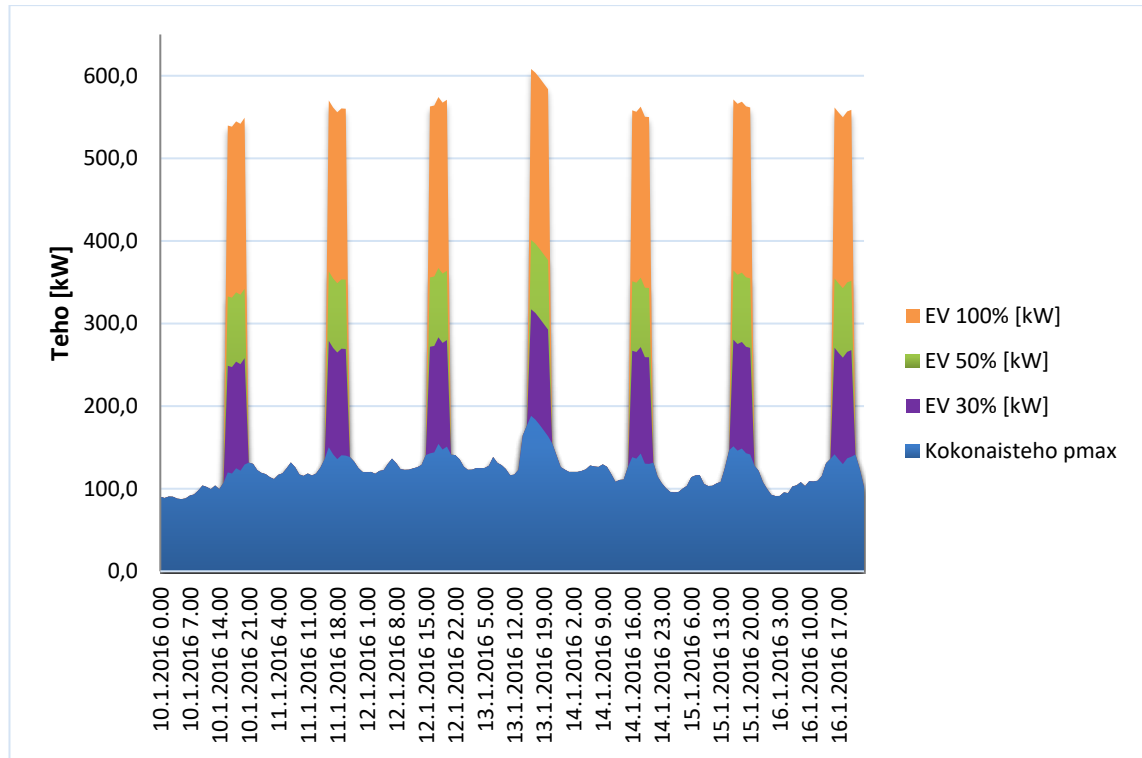
Taajama-alueidenyksittäiset muuntopiirit ovat asiakasmäärältään suuria ja tiheästi asuttuja. Kuvassa 11 voidaan nähdä esimerkki pj-verkko taajama-alueilla. Verkko koostuu neljästä eri pienjännitejohdon haarasta ja 147 käyttöpaihasta.



Kuva 11. Taajama esimerkiverkon kuormituskasvu

Kuvasta 11 voidaan nähdä, että taajamissa kuormitus on keskittynyt suppeam-
malle alueelle haja-asutusalueeseen nähden, jolloin myös verkossa voi esiintyä
ongelmia termisen kestoisuuden kannalta.

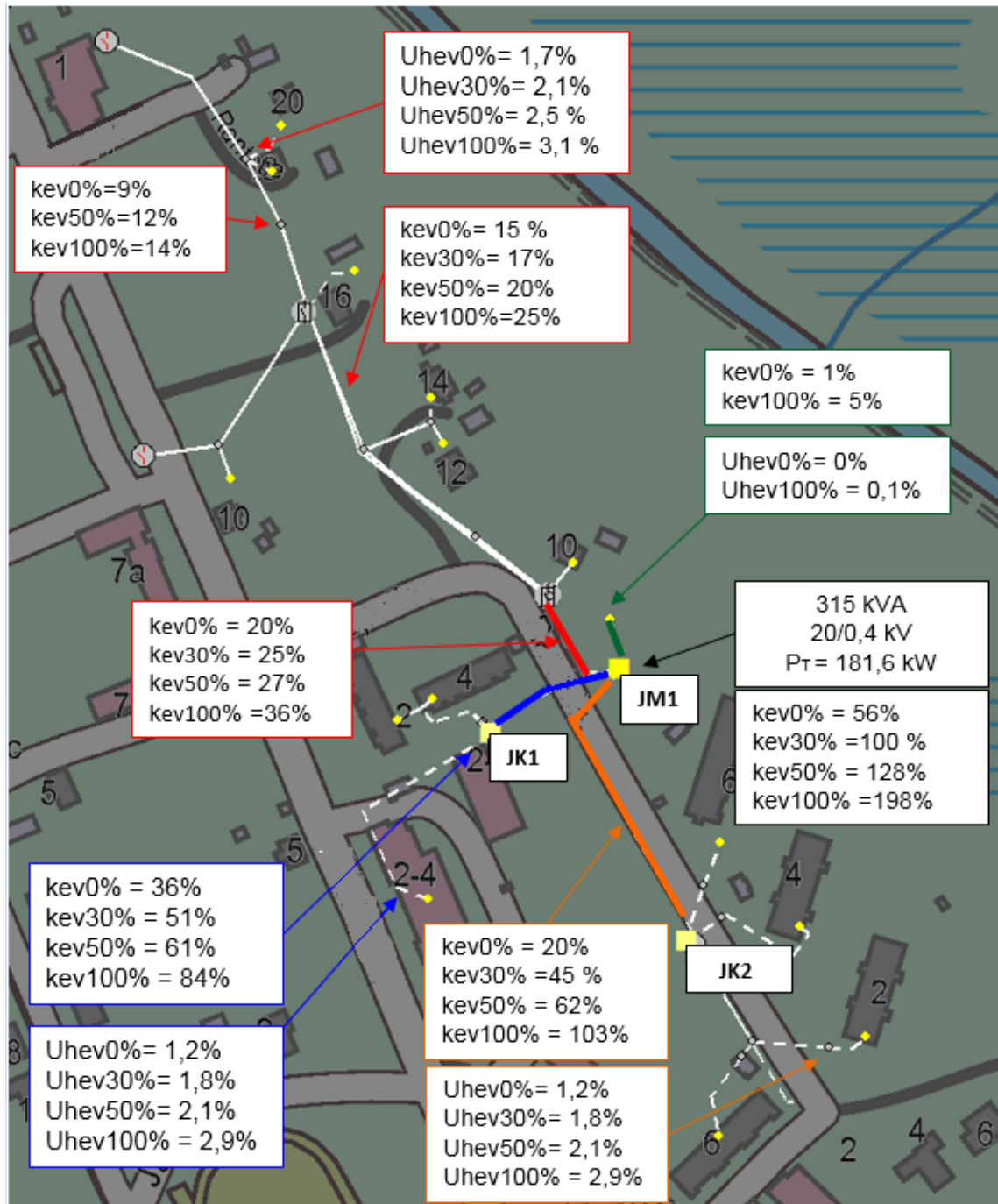
8.1 Taajama- alueen muuntopiirin kuormitettavuus



Kuvio 2. Sähköautojen latauksen vaikutukset taajama-alueen verkon huipputehoon.

Kuvio 2 esittää esimerkki taajama-alueen Pj-verkon huipputehon kasvua sähkö-
auton yleistymisen vaikutuksesta. Taulukosta voidaan nähdä, että sähköautojen
yleistymisen noustessa 100 %, verkon huipputeho kasvaa jopa kuusikertaiseksi
verkon nykyhetkelliseen tilaan nähden.

8.2 Taajama - alueen runkojohdon suojaus ja jännitteenalenema



Kuva 12. Taajama-alue esimerkki verkon johtimien kuormitusaste kj% ja jännitteenalenema Uh%

Kuvassa 12 on esitetty taajama alueen pj-verkon kuormitusaste runkojohtojen eri osissa sekä kaukaisimman käyttöpisteen jännitteenalenema. Suurimman käyttöpakkamäärän kattavan haaran runkojohtona toimii maakaapeli 2XAXMK 4X185,

jonka terminen kestoisuus on 375,2 kW ja maksivirta on 330 A. Runkojohdossa käytetyn varokkeen sulakekoko on 315 A.

Runkojohdon mitattu teho on normaalitilassa 78,3 kW, mikä vastaa 115 A. Tämän suuruinen teho kuormittaa runkojohtoa termisen kestoisuuteen kaavan 4. perusteella 20 %. Runkojohdon kaukaisin käyttöpaikan jännitteenalenema on mitattu teholla 1,2 %. Tällä perusteella pj-verkko on mitoitettu oikein.

Kun sähköautojen yleistyminen lähestyy 100 %, runkojohdon teho kasvaa 388,3 kW:iin, mikä vastaa 590 A. Jännitteenalenema tällä teholla on 2,9 %, joka on hyväksytyn vaihtelun sisällä. Kuitenkin runkojohdon kuormittavuusaste on mitatun tehon perusteella 103 %, mikä ylittää sallitun arvon.

Sulakkeen koon suurentaminen ei ole mahdollista, sillä runkojohto on varustettu suurimmalla sallitulla sulakkeella. Jotta sähköautojen lataus voidaan suorittaa kaikilla käyttöpaikoilla samanaikaisesti, runkojohdon poikkipinta-ala täytyy suurentaa esimerkiksi 2XAXMK 4X240-voimakaapeliin.

8.3 Jakelumuuntajan kuormitettavuus taajama- alueella

Tarkastellaan koko pienjänniteverkon kuormituksen vaikutuksia jakelumuuntamoon. Muuntamo on varustettu 315 kVA jakelumuuntajalla. Pienjänniteverkon normaalitilanteessa todellinen mitattu teho on 126,4 kW. Kaavan 5 perusteella pienjännitteen mitattu teho kuormittaa jakelumuuntajaa 56 %. Jakelumuuntaja on kuormitukseen nähden mitoitettu oikein.

Sähköautojen yleistyminen pienjänniteverkon kaikissa käyttöpaikoissa nostaa kuormitettavuuden 567,4 kW:iin. Jakelumuuntaja kuormitetaan termisen kestoisuuteen nähden 198 %, mikä ylittää sallitun ylikuormitusarvon. Jakelumuuntaja tulisi tällöin vaihtaa sähköautojen yleistymisen vaikutukseen suuremmaksi

9 TULOSTEN ARVIOINTI

Tutkinnassa tarkasteltiin kaiken kaikkiaan 41 muuntamon pienjänniteverkkoa, josta 22 sijaitsi haja-asutusalueella ja 19 taajama-alueilla. Molempien alueiden pj-verkoissa tarkasteltiin runkojohtojen ja muuntajien kuormitettavuusasteiden sekä jännitteenaleneman muutoksia sähköautojen määrään vaikutuksesta. Tässä kappaleessa on esitetty sähköautojen yleistymisen vaikutuksia kaikissa tutkituissa haja-asutus- ja taajama-alueiden pj-verkoissa.

9.1 Johtimen kuormitusaste

Taulukossa 3 nähdään sähköautojen yleistymisen vaikutukset tutkittujen muuntamoiden runkojohtimien termisen kestoisuuden kannalta. Taulukosta voidaan nähdä, että molempien tutkimusalueiden runkojohtimet kuormitusaste normaali-tilanteessa ovat alle 40 prosentin johtimien termisen kestoisuuteen nähden.

Taulukko 3. Tutkittujen pj-verkkojen runkojohtimien kuormitusaste

Johtimen kuormitusaste k_j %	Haja-asutusalue		Taajama-alue	
	Sähköautojen yleistymisen 0 %	Sähköautojen yleistymisen 100 %	Sähköautojen yleistymisen 0 %	Sähköautojen yleistymisen 100 %
alle 10 %	74 %	21 %	49 %	5 %
10 - 40 %	26 %	76 %	49 %	77 %
40 - 70 %	0 %	3 %	3 %	14 %
yli 70 %	0 %	0 %	0 %	4 %

Sähköautojen 100 %:n yleistymisen nostaa pienjännitejohtimien kuormitusta huomattavasti molemmissa tutkimusalueissa. Sekä haja-asutus-, että Taajama-alueiden runkojohtimien kuormitusaste nousee 10-40 prosentin välille. Taajama-alueilla esiintyi myös tilanteita, jossa kuormitusaste kasvoi yli 70 prosentin. Näissä tilanteissa runkojohtoa käytettiin liittämään suuria käyttöpaikkamääriä, kuten esimerkiksi kerros - ja rivitaloja jakeluverkkoon. Kuitenkin näistä tilanteista vain yksi runkojohtimen kuormitusaste kasvoi niin suureksi, että sen poikkipinta-ala olisi suurennettava sähköautojen latauksen suorittamiseksi.

Suuresta kuormituskasvusta huolimatta, pj - verkon runkojohtimen terminen kuormitus ylitetään vasta silloin, kun verkon kaikki käyttöpaikat lataisivat sähköautojaan samanaikaisesti. Tällainen tilanne on kuitenkin hyvin epätodennäköistä, joten johtimien poikkipintojen suurentaminen sähköautojen lataukseen nähden ei ole tällä hetkellä teknistaloudellisesti kannattavaa.

9.2 Jännitteenalenema

Taulukkoon 4. on esitetty tutkittujen muuntamoiden kaukaisimman käyttöpaikan lasketun jännitealenema esiintymä nykyhetkessä, sekä sähköautojen 100 prosenttinen yleistymisen vaikutukset jännitteenalenemaan. Taulukosta voidaan päätellä, että suurimmat jännitteenalenema vaihtelut esiintyvät haja-asutusalueilla, pitkien kantomatkoihin johtuen.

Taulukko 4. Tutkittujen pj-verkkojen jännitteenalenema

Jännitteen- alenema	Haja-asutusalue		Taajama-alue	
	Sähköautojen yleistyminen 0 %	Sähköautojen yleistyminen 100 %	Sähköautojen yleistyminen 0 %	Sähköautojen yleistyminen 100 %
Alle 3 %	88 %	44 %	95 %	78 %
3 % - 5 %	12 %	50 %	4 %	17 %
5 % - 7 %	0 %	3 %	0 %	5 %
Yli 7 %	0 %	3 %	0 %	0 %

Kun sähköautojen yleistymisen pienjänniteverkossa on 100 prosenttia, 50 % tutkituista haja-asutusalueen muuntamoiden jännitteenalenema nousee 3-5 prosentin välille. Kolme prosenttia tutkituista muuntamoiden käyttöpaikkojen jännitealenema nousi yli seitsemän prosentin, mutta sallittua jännitevaihtelua ei koskaan ylitetty tutkimuksessa.

9.3 Jakelumuuntajan kuormitus

Taulukkoon 5 on kerätty tutkittujen Pj - verkkojen nykyhetkelliset jakelumuuntajien kuormitusaste sekä niiden muutokset sähköautojen yleistymisen aikana. Molemmissa tutkituissa alueissa esiintyi tilanteita, jossa kuormitusaste ylitti jakelumuuntajan sallitun arvon.

Taulukko 5. Tutkittujen pj - verkkojen muuntajan kuormitusaste.

Muuntaja kuormitus- aste k_T %	Haja-asutusalue		Taajama-alue	
	Sähköautojen yleistyminen	Sähköautojen yleistyminen	Sähköautojen yleistyminen	Sähköautojen yleistyminen
	0 %	100 %	0 %	100 %
alle 50 %	64 %	14 %	74 %	26 %
50 -100%	36 %	36 %	26 %	53 %
100 - 130 %	0 %	36 %	0 %	11 %
Yli 130 %	0 %	9 %	0 %	16 %

Jakelumuuntajan sallitun kuormitusarvon ylittymisen esiintymä voidaan nähdä tutkituissa muuntamoissa taajama-alueilla suurien asiakasmääristä johtuen. Haja-asutusalueiden muuntajien ylikuormitus vaikuttaa pj-verkkojen pienillä nimellisarvoilla varustetut jakelumuuntajat.

10 POHDINTA

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää nykyisen pienjänniteverkkojen toimivuus sähköautojen yleistymisen vaikutuksesta. Käyttöpaikkojen etäluettavista mittareista saaduista tuntitehomittauksista saatiin tarkka kuva pienjänniteverkon nykyhetkellinen kuormituksesta ja sen muutoksesta sähköautojen yleistymisen vaikutuksesta.

Edellä esitettyjen tulosten perusteella voidaan todeta, ettei sähköautojen yleistyminen tule aiheuttamaan merkittäviä ongelmia haja-asutusalueilla. Tutkituissa tapauksissa suurimmat ongelmatapauksia esiintyvät pj-verkon jännitteenalene-
maan vaikutuksesta asiakkaiden sähkönlaatuun. Lisäksi sähköautojen yleistyminen voi vaikuttaa etenkin haja-asutusalueiden pienten muuntajakoneiden ylikuormitukseen.

Pienjänniteverkon osien ylikuormitus yli sallittujen arvojen esiintyi vähäisesti taa-
jama-alueilla, joissa asiakastiheys on suuri. Ongelmia voi esiintyä, kun kaikki ker-
rostalojen asiakkaat lataavat sähköautoa samanaikaisesti. Pienjänniteverkon
systemaattinen ylimitoittaminen sähköautojen varalta ei ole kuitenkaan tässä vai-
heessa teknistaloudellisesti kannattavaa.

Tutkimustulosten perusteella sähköautojen lataus voidaan suorittaa yksivaihei-
sen pistorasian välityksellä pienjänniteverkon kojeiston suojauksen ja kestävyyy-
den kannalta päivittäisen kilometrikulutuksen korvaamiseksi. Suuremman teho-
kulutuksen korvaamiseksi lataus kannattaisi suorittaa käyttämällä edellä mainit-
tuja, lataukseen tarkoitettua kiinteitä latausjärjestelmiä.

LÄHTEET

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot 1. Helsinki: Otatieto.

Fingrid 2017. Voimajärjestelmä. Suomen sähkösiirtojärjestelmät. Viitattu 19.11.2017. [http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimajarjestelma/Suomen sähkövoimajärjestelmä](http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimajarjestelma/Suomen_sahkovoimajarjestelma)

Galkin-Aalto, M. 2017. Suomen ensimmäinen kaksisuuntainen latauspiste Helsinkiin. Artikkel. Viitattu 16.10.2017. <https://www.helen.fi/uutiset/2017/V2G/>

Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. 3. painos. Helsinki: Otatieto.

Haaranen, M. 2011. Rovakaira Oy:n keskijänniteverkon kehittämissuunnitelma toimitusvarmuuskriteeristön näkökulmasta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Hietalahti, L. 2011. Sähkökäyttö -ja hybriditekniikkaa. Vantaa: Tammertekniikka.

Linja-aho, V. 2012. Sähkö - ja hybridiajoneuvojen sähkötyöturvallisuus. Helsinki: Autoalan koulutuskeskus Oy.

Nevalainen, J. 2010. Sähköajoneuvojen vaikutukset sähköverkkoon. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kandidaattityö.

Motiva 2015. Kiinteistöjen latauspaikat-esiselvitys. Helsinki: Motiva. https://www.motiva.fi/files/10869/Kiinteistojen_latauspaikat_-_esiselvitys.pdf

Motiva 2017a. Akut. viitattu 5.11.2017. https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/akut

Motiva 2017b. Ladattavat hybridiauto. Viitattu 15.10.2017. https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/autotyyppi/ladattava_hybridiauto

Motiva 2017c. Täyssähköauto. Viitattu 15.10.2017. https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_vii-saasti/autotyyppi/tayssahkoauto

Plug it 2017a. Sähköauton lataustavat. viitattu 10.11.2017. <https://plugit.fi/fi-fi/article/etusivu/sahkoauton-lataustavat/137/#>

Plug it 2017b. Sähköautotyytit. Viitattu 10.11.2017. <https://plugit.fi/fi-fi/article/sahkoautot/sahkoautotyytit/172/>

Rovakaira 2017. Rovakaira. Viitattu 20.11.2017. <http://www.rovakaira.fi/Rovakaira>

Sesko 2015. SK69 - Sähköajoneuvojen lataaminen kiinteistöjen sähköverkoissa.PDF- tiedosto. Viitattu 31.9.2017. http://www.sesko.fi/files/431/Lataussuositus_2014_2015-07-13.pdf

Sähköinen liikenne 2017a. Ladattavan sähköajoneuvon ostajan opas. Viitattu 10.11.2017. <http://www.sahkoinenliikenne.fi/opaat/ladattavan-ajoneuvon-ostajan-opas>

Sähköinen liikenne 2017b. Suomen julkiset latauspisteet. <http://www.sahkoinenliikenne.fi/suomen-julkiset-latauspisteet>

Tesla 2017 .Model S. Viitattu 20.10.2017.https://www.tesla.com/fi_FI/models

Treatise 2006. Vaihtoehtoiset polttoaineet ja ajoneuvot. Motiva Oy. PDF-tiedosto. viitattu 1.11.2017. https://www.motiva.fi/files/2131/Vaihtoehtoiset_polttoaineet_ja_ajoneuvot.pdf

Traffi 2017. Tietopalvelu. Tilastot. Tieliikenne. Viitattu 18.10.2017. <https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot>

Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. Energia 4/2017. Viitattu 10.10.2017. <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/79189>